

Рис. 3. Зависимость выхода концентрата от его зольности при разных вариантах схем гравитационного обогащения

Как следует из графиков самый большой выход концентрата при одинаковой его зольности получается по варианту В. Так, при $A^d_k = 3,5$ % значения выходов были следующими: $\gamma_k^A = 64,77$ %; $\gamma_k^B = 64,70$ %; $\gamma_k^C = 65,09$ %, $\gamma_k^D = 65,02$ %.

Подставляя значения элементарной зольности разделения, соответствующие заданной зольности концентрата, в выражения (3–7), можно вычислить также показатели продуктов обогащения по отдельным операциям.

Выводы и направление дальнейших исследований. Таким образом, полученные зависимости дают полное описание исследуемых вариантов схем гравитационного обогащения. Использование выражений (8) позволит оценить приведенные затраты на приготовление 1 т твердой фазы водоугольного топлива с различным уровнем зольности по каждой технологической схеме и определить наиболее эффективный с экономической точки зрения вариант.

Список литературы

2. Макаров А.С. и др. Водоугольное топливо на основе углей различной стадии метаморфизма. / А. С. Макаров, Д. П. Савицкий, А. И. Егурнов // Современная наука. – 2011. – № 1. – С. 16-20.
2. Макаров А.С. и др. Получение высококонцентрированного угольного топлива на основе отходов углеобогащения для использования в энергетическом комплексе Украины. / А.С. Макаров, О.М. Кобитович, А.И. Егурнов, С.Д. Борук, Д.П. Савицкий // Наук.-техн. Зб. «Збагачення корисних копалин». – 2008. – вип. 33(74). – с. 138-148.
3. Дроздник И.Д. и др. Рынок угля и перспективные направления его использования: информационно-аналитический обзор. / И.Д. Дроздник, А.В. Орлов, В.В. Черкасов / – Харьков, 2004. – 188 с.
4. Мосин С.И. и др. Российский опыт внедрения промышленной технологии производства водоугольного топлива. / С. И. Мосин, А. Г. Морозов, Г. Н. Делягин // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 9. – С. 22-28.
5. Самойлик В.Г. и др. Исследование влияния содержания минеральных примесей на реологические свойства водоугольных суспензий / В. Г. Самойлик, А. Т. Елишевич, Н. Г. Корженевская, С. Л. Хилько // Химия твердого топлива. – 1988. - № 5. – С. 130-133.
6. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М: Химия, – 1980 - 320 с.
7. Ходаков Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике// Теплоэнергетика. – 2007. – № 2. – С. 104-119.
8. Самойлик В.Г. Исследование воздействия аполлярных реагентов на текучесть водоугольных суспензий / В.Г. Самойлик, Е.И. Назимко // Наук.-техн. Зб. «Збагачення корисних копалин». – 2012. – вип. 50(91). – с. 147-153.
9. Папушин Ю.Л. та інші. Дослідження корисних копалин на збагачуваність. / Ю. Л. Папушин, В. О. Смирнов, В. С. Білецький / Східний видавничий дім. – 2006. – 246 с.

Рукопись поступила в редакцию 11.04.13

УДК 621.926:34.16

Н.В. МОРКУН, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

СИНТЕЗ ЛИНЕЙНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО БЛОКА СТРУКТУР ВИНЕРА-ГАММЕРШТЕЙНА НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ ЛАГЕРРА

Изложены основные принципы представления линейного блока структур Винера-Гаммерштейна в виде пространственно-временной модели Лагерра

Ключевые слова: синтез, структуры Винера-Гаммерштейна, модель Лагерра

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В обогащении полезных ископаемых в настоящее время особое внимание уделяется оптимизации технологических процессов. Такой подход требует наличия качественной информации о процессе, формирования соответствующей базы данных и их последующей обработки для построения адекватных и эффективных математических моделей процессов и систем. В промышленных условиях часто применяется феноменологический подход, основанный на анализе данных активных и пассивных экспериментов [1-6]. Это позволяет определить зависимости между качественными показателями моделируемого процесса и условиями в которых он протекает. Этот эвристический подход, основанный на основных закономерностях моделируемых явлений, позволяет опреде-

лить и оправданную форму модели. Конечные результаты работы обогатительной фабрики зависят от комплекса взаимосвязанных процессов. Этот факт требует применения соответствующего подхода при моделировании технологических процессов, который учитывает их комбинации и который гарантирует оптимизацию работы всей структуры [1-4].

Анализ исследований и публикаций. Применяемые в настоящее время математические модели процессов обогащения могут быть разделены на несколько групп в зависимости от метода построения модели, ее структуры, специфики процесса и уровня использования информации о процессе. Упомянутые выше эвристические модели основаны на уравнениях массового и энергетического баланса, а также на выражениях, описывающих используемые физико-химические процессы [4,5].

В работе [6] предложены модели и алгоритмы оперативной идентификации объектов обогатительного производства на базе гибридных моделей Гаммерштейна (рис.1), позволяющие осуществлять управление процессами магнитного обогащения в условиях нечеткой информации о свойствах руды и показателях технологического процесса.

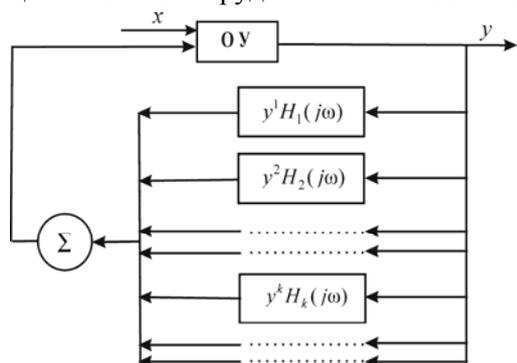


Рис. 1. Рекурсивно-параллельная модель Гаммерштейна: $H(j\omega)$ - комплексный коэффициент передачи; $X(j\omega)$ - входная величина; $Y(j\omega)$ - выходная величина; $j = \sqrt{-1}$; ω - угловая частота колебаний входного сигнала

Показано, что в условиях неполного и нечеткого информационного обеспечения прогнозирующее управление процессами магнитного обогащения железными руд на основе гибридной модели Гаммерштейна, в которой нелинейный блок аппроксимирован нечеткой моделью Такаги-Сугэно, а линейный динамический блок представлен авторегрессионным

уравнением, способствует повышению эффективности процесса управления. Однако такое представление линейного динамического блока не позволяет выполнить качественную идентификацию модели в случае ее многоканальной пространственно-временной структуры.

Цель исследований. Целью синтез линейного динамического блока структур Винера-Гаммерштейна на основе пространственно-временной модели Лагерра.

Изложение материала и результаты. Рассмотрим нелинейную динамическую модель Гаммерштейна с распределенными параметрами. Каждый канал такой структуры представлен каскадной связкой статического нелинейного блока и динамического линейного блока, на базе пространственно-временной модели Лагерра.

Как показано в работе [7] сигнал $x(t)$, определенный на интервале $(0, \infty)$, можно представить в виде разложения по системе функций Лагерра

$$x(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda_i l_i(t) . \quad (1)$$

Значения коэффициентов $\lambda_i, i=0,1, \dots$, вычисляются по формуле

$$\lambda_i = \int_0^{\infty} x(t) l_i(t) dt . \quad (2)$$

Совокупность коэффициентов $\lambda_i, i=0,1, \dots$, представляет спектр сигнала в базисе функций Лагерра, которые получают с помощью ортогональных полиномов, расчетная формула которых имеет вид [8]

$$L_n(\tau) = \frac{e^{\tau} d^n}{n! d\tau^n} (\tau^n e^{-\tau}), \quad \tau \geq 0 . \quad (3)$$

Первые пять полиномов в соответствии с этой формулой описываются выражениями

$$\begin{aligned} L_0(\tau) &= 1; \\ L_1(\tau) &= 1 - \tau; \\ L_2(\tau) &= 1 - 2\tau + \tau^2 / 2; \\ L_3(\tau) &= 1 - 3\tau + 3\tau^2 / 2 - \tau^3 / 6; \\ L_4(\tau) &= 1 - 4\tau + 3\tau^2 - 2\tau^3 / 3 - \tau^4 / 24. \end{aligned} \quad (4)$$

Полиномы Лагерра ортогональны на полуоси $0 < \tau < \infty$ с весом $\rho(\tau) = \exp(-\tau)$, т.е. они удовлетворяют условию

$$\int e^{-\tau} L_n(\tau) L_m(\tau) d\tau = \begin{cases} r_n = (n!)^2 & \text{при } n = m, \\ 0 & \text{при } n \neq m. \end{cases} \quad (5)$$

Поскольку полиномы Лагерра образуют систему расходящихся при $\tau \rightarrow \infty$ функций, для разложения сигналов используют функции Лагерра

$$l_n(\tau) = \sqrt{\rho(\tau)} L_n(\tau) = e^{-\tau/2} L_n(\tau), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

После замены $\tau = 2\xi t$ и умножения на нормирующий коэффициент $\sqrt{2\xi}$ первые пять функций Лагерра принимают вид [7]

$$\begin{aligned} L_0(t) &= \sqrt{2\xi} \cdot e^{-\xi t}; \\ L_1(t) &= \sqrt{2\xi} \cdot e^{-\xi t} (1 - 2\xi t); \\ L_2(t) &= \sqrt{2\xi} \cdot e^{-\xi t} (1 - 4\xi t + 2\xi^2 t^2); \\ L_3(t) &= \sqrt{2\xi} \cdot e^{-\xi t} (1 - 6\xi t + 6\xi^2 t^2 - 4\xi^3 t^3 / 3); \\ L_4(t) &= \sqrt{2\xi} \cdot e^{-\xi t} (1 - 8\xi t + 12\xi^2 t^2 - 16\xi^3 t^3 / 3 + 2\xi^4 t^4 / 3). \end{aligned} \quad (7)$$

где ξ - масштабный коэффициент.

В общем виде функции описываются формулой

$$l_n(t) = \sqrt{2\xi} \cdot e^{-\xi t} \sum_{j=0}^n (-1)^j \frac{C_n^j}{j!} (2\xi t)^j, \quad (8)$$

где C_n^j - число сочетаний из n по j .

Функции Лагерра образуют полную и ортогональную систему на одностороннем интервале $[0, \infty)$, т.е. они удовлетворяют соотношению

$$\int_0^{\infty} l_n(t) l_m(t) dt = \begin{cases} 1 & \text{при } n = m, \\ 0 & \text{при } n \neq m. \end{cases} \quad (9)$$

Номер функции Лагерра соответствует числу пересечения ею нулевого уровня.

Выражение (8) в области преобразования Лапласа будет иметь изображение

$$L_n(\alpha, s) = \frac{\sqrt{2\xi}}{s + \xi} \left(\frac{s - \xi}{s + \xi} \right)^n \quad (10)$$

Таким образом n -я функция Лагерра определяется из функции с номером $n - 1$ путем умножения на элемент с передаточной функцией

$$L(\alpha, s) = \frac{s - \xi}{s + \xi}. \quad (11)$$

Представление линейного блока структур Винера-Гаммерштейна в виде пространственно-временной модели Лагерра использовалось при моделировании процесса формирования распределения полезного компонента по различным фракциям крупности измельченной руды технологическими агрегатами обогатительной фабрики. На рис. 2 показана структура пространственно-временной модели Лагерра c^{ro} канала [9,10]. Передаточные функции, приведенные на рис. 2, могут быть получены из (10) следующим образом

$$k_1(s) = \frac{\sqrt{2\xi}}{s + \xi}, \quad k_2(s) = \dots = k_l(s) = \frac{s - \xi}{s + \xi}, \quad (12)$$

где ξ - определяющий масштаб времени коэффициент.

Важным пунктом синтеза модели с использованием функций Лагерра является выбор значения масштабного коэффициента ξ . Его начальное значение рекомендуется выбирать так, чтобы длительности исследуемого сигнала и функции Лагерра с номером $i \approx N/2$ были примерно равны [7]. В последующем значение коэффициента ξ может уточняться.

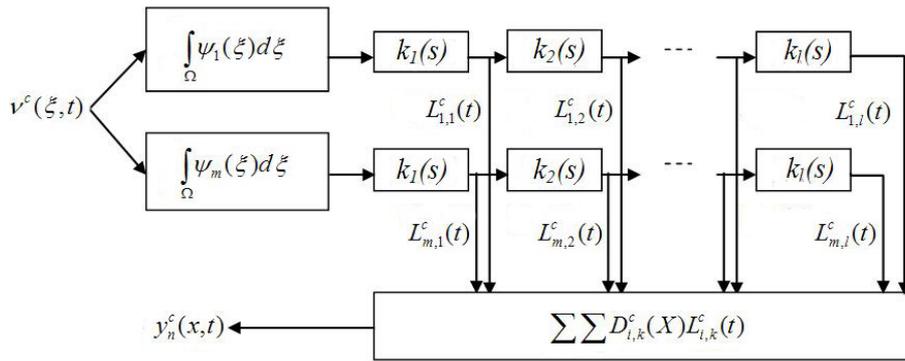


Рис. 2. Пространственно-временная модель Лагерра c^{ro} канала

Если для аппроксимации сигнала используется усеченный ряд

$$x^*(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \lambda_i l_i(t), \quad (13)$$

то для оценки качества его аппроксимации может быть использована величина [7]

$$e_{xN} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{C_i^2}{E_x}, \quad (14)$$

где $E_x = \int_0^{\infty} x^2(t) dt = \sum_{i=0}^{\infty} C_i^2$ - часть сигнала, аппроксимируемая первыми N членами разложения.

Теоретические исследования и результаты применения на практике показали, что необходимая точность аппроксимации слабоколебательных сигналов усеченным рядом (13) достигается при $N = 4-7$ [7,8]. При большем числе функций в усеченном ряду возникают трудности вычислительного характера, которые обусловлены, во-первых, необходимостью вычисления степенных рядов a , во-вторых, тем, что вычисления функций Лагерра с большими номерами требуют малого интервала дискретизации на начальных участках.

Выводы. Если временной масштаб ξ выбран правильно, ряд Лагерра может эффективно смоделировать любой устойчивый линейный объект. Задачу практического определения временного масштаба целесообразно решать комбинированным способом, включая off-line оптимизацию и адаптацию on-line.

Список литературы

1. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984, 208 с.
2. А.Дж. Линч. Циклы дробления и измельчения / Линч А.Дж. - М.: Недра, 1981. - 342 с.
3. Процуто В.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных фабрик. - М.: Недра, 1987. – 253 с.
4. Моркун В.С. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов и адаптивное управление процессами измельчения-классификации руд на его базе: / В.С. Моркун. - Дисс. ... докт. техн. наук: 05.13.07. - Кривой Рог, 1999. - 401 с.
5. Подгородецкий Н.С. Энергоэффективное адаптивное управление замкнутым циклом измельчения руды на базе гибридной нечеткой модели / Н.С. Подгородецкий: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Кривий Ріг, 2011. - 24 с.
6. Поркуян О.В. Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна / О.В. Поркуян: Автореф. дис. докт. техн. наук. - Кривий Ріг, 2009. - 36 с.
7. Вадутов Олег Самигулович. Математические основы обработки сигналов. – Режим доступа: <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/v/VOS/study/disc1/>
8. Полиномы Лагерра. – Режим доступа: <http://alglib.sources.ru/specialfunctions/polynomials/laguerre.php>
8. Chenkun Qi, Hai-Tao Zhang, Han-Xiong Li. A multi-channel spatio-temporal Hammerstein modeling approach for nonlinear distributed parameter processes. http://www.control.eng.cam.ac.uk/Homepage/papers/cued_control_1046.
9. Qi Chenkun. Modelling of nonlinear distributed parameter system for industrial thermal processes. <http://lbms03.cityu.edu.hk/theses/abt/phd-meem-b23750911a>

Рукопись поступила в редакцию 22.02.13

УДК 331.45:338.2